

# INCORPORACIÓN DE BENEFICIOS POR REDUCCIÓN DE HACINAMIENTO EN LA EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS

Rodrigo Contreras <sup>1\*</sup>, Rodrigo Godoy <sup>2</sup>, Carlos Mella <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Chile

<sup>2</sup> Empresa de los Ferrocarriles del Estado, Chile

---

\*Autor para  
correspondencia:  
[rcontreras@mtt.gob.cl](mailto:rcontreras@mtt.gob.cl)

## RESUMEN

La revisión de la práctica reciente evidencia la necesidad de incorporar dimensiones actualmente no consideradas a la evaluación de proyectos de transporte dentro del contexto del Sistema Nacional de Inversiones de Chile (SNI). En este trabajo se propone y aplica una metodología para incorporar el fenómeno de hacinamiento al análisis del transporte público urbano. La metodología adapta los consistentes resultados de las aproximaciones microeconómicas al problema, compatibilizándolas con las herramientas de simulación de nivel estratégico con que se analizan los proyectos estructurales de transporte en el país. Se evalúan tres proyectos con el método propuesto, concluyendo que el no incluir el concepto de disminución de hacinamiento reduce de forma considerable sus beneficios en todos los casos.

**Palabras clave** hacinamiento, evaluación social, transporte público.

## ABSTRACT

*The review of recent practice shows the need to include dimensions not currently considered in the appraisal of transport projects within the context of the Chilean National Investment System (SNI). In this paper, a methodology is proposed and applied to incorporate the phenomenon of overcrowding in the analysis of urban public transport. The methodology adapts the consistent results of microeconomic approaches to the problem, making them compatible with the strategic-level simulation tools used to analyse major transportation projects in Chile. Three projects are evaluated with the proposed method, concluding that omitting the effects of alleviating overcrowding considerably reduces the benefits of these projects.*

**Keywords** crowding, social appraisal, public transport.

---

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Las metodologías con que se analizan las iniciativas de inversión pública en Chile se enmarcan dentro del Sistema Nacional de Inversiones (SNI), que además incluye las normas y procedimientos relevantes desde su formulación hasta su ejecución. En particular, para las intervenciones dentro del sector de transporte, generalmente se instruye que los procesos de evaluación social incluyan un análisis costo-beneficio.

Las intervenciones en los sistemas de transporte generan una amplia gama de efectos, descritos en Litman (2020). Además de los ahorros de tiempo de los usuarios, generalmente el beneficio más relevante en los análisis costo-beneficio, cada país incorpora un conjunto distinto de impactos en la evaluación social (una revisión de varias prácticas nacionales de evaluación de proyectos se puede encontrar en Mackie y Worlsey, 2013). Algunos de los impactos tradicionalmente incluidos son los cambios en el costo de operación de vehículos, la reducción de emisiones, la reducción de accidentes, la confiabilidad del tiempo de viaje, el nivel de congestión percibido y el grado de hacinamiento en vehículos de transporte público. Además, existe un conjunto de impactos económicos más amplios, de monetización más difícil, dada la ausencia de datos de calidad, cuya discusión toma creciente relevancia. La decisión sobre qué impactos incluir en la evaluación social es muy importante, pues tratamientos incompletos aumentan la posibilidad de sesgar la inversión hacia proyectos que se adaptan bien a evaluaciones limitadas (como la expansión de carreteras) en desmedro de proyectos y estrategias de inversión que busquen dar impulso al transporte público (ITF, 2017).

La práctica nacional en evaluación de proyectos de transporte incluye actualmente los beneficios producto de ahorros en consumo de tiempo y costos de operación de los distintos modos considerados (MDS-Sectra, 2013). Consideraciones adicionales (como impactos ambientales, comodidad del usuario, impactos urbanos, etc.) pueden ser recogidas mediante un análisis multicriterio.

Los numerosos impactos del hacinamiento (entendido como la incomodidad producida por una alta densidad de personas) en el transporte público son descritos por Tirachini et al. (2013). En particular, se reconoce que el valor del tiempo de viaje crece conforme aumenta el grado de hacinamiento (pues la disposición a pagar en condiciones de incomodidad es más alta). La modelación microeconómica de este efecto tradicionalmente utiliza ejercicios de preferencias declaradas para estimar modelos del tipo logit multinomial. En algunas prácticas avanzadas de evaluación de proyectos, se utilizan estos resultados para considerar valores del tiempo distintos, función del grado de hacinamiento (Mackie y Worsley, 2013).

En este trabajo se presenta una forma de incorporar los beneficios debidos a la reducción del hacinamiento a la evaluación social de proyectos, considerando simulaciones a nivel macroscópico, típicamente utilizadas en la práctica nacional para el análisis estratégico de proyectos estructurales de transporte público urbano. El método considera que cada minuto consumido en la red simulada de transporte público, tiene un precio que es función del grado de hacinamiento que los usuarios del arco experimentan, calculado como un ponderador sobre un valor del tiempo base. La estructura del artículo es la siguiente: en la segunda sección se presenta una revisión bibliográfica sobre dos dimensiones: las descripciones teóricas sobre el efecto del hacinamiento en la valoración de los ahorros de tiempo y la práctica internacional en evaluación social de proyectos que intenta recoger

este fenómeno. En la tercera sección se presenta la definición de una medida de hacinamiento coherente con la práctica actual de simulación de proyectos a nivel macroscópico, la forma funcional escogida para el ponderador del valor del tiempo en función del grado de hacinamiento, y los supuestos necesarios para compatibilizar estos análisis con el valor actualmente vigente. En la cuarta sección se presentan los resultados del uso de este método en la evaluación social de tres proyectos de transporte público, incorporando sensibilizaciones a los parámetros escogidos. Finalmente, se presentan las conclusiones en la quinta sección.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Marco Teórico

Según Wardman y Whelan (2011), el impacto del hacinamiento en la valoración del tiempo ha sido bien estudiado (al menos en trenes) en el Reino Unido. En efecto, su revisión de 17 estudios al respecto permite encontrar algunos enfoques comunes que influyeron notoriamente en enfoques más recientes. Por otra parte, Li y Hensher (2011) incluyen también en su revisión estudios de otros países, sobre usuarios de bus, y sobre hacinamiento en estaciones.

Generalmente, el enfoque escogido es el de preferencias declaradas, en que se estudia la propensión del usuario a hacer un canje entre minutos de viaje (o dinero) a cambio de variaciones en el nivel de hacinamiento experimentado en el viaje. Por ejemplo, a partir de la conocida forma funcional de la utilidad modal lineal en tiempo y costo, se postulan funciones de utilidad para un modo de transporte público  $i$  en las que el parámetro del tiempo depende del grado de hacinamiento  $H$ :

$$V_i = \alpha_i + \beta(H) \text{ tiempo}_i + \gamma \text{ costo}_i \quad (1)$$

A partir de modelos de elección discreta, generalmente del tipo logit (multinomial, potencialmente incorrecto, ya que no considera el efecto panel, o mixto), se encuentra una expresión para la función  $\beta$ . El ponderador por hacinamiento del tiempo de viaje es la función que representa cuánto más desagradable es el tiempo de viaje en condiciones de hacinamiento, respecto de un valor base con hacinamiento cero.

$$P(H) = \frac{\beta(H)}{\beta(H_0)} \quad (2)$$

La forma de presentar el hacinamiento varía entre los experimentos realizados, utilizándose tanto descriptores escritos como diagramas o imágenes representativas. La forma de incluirlo en la función ha sido tanto como factor de carga, número de pasajeros de pie o densidad de pasajeros de pie. Por otra parte, algunos de los estudios han encontrado valoraciones medidas en unidades monetarias por minuto o minutos por minuto, las que pueden interpretarse como variaciones del enfoque de ponderador del tiempo. También se encuentran algunos estudios en que se obtienen valores de unidades monetarias por viaje. En Whelan y Crockett (2009), se estiman ponderadores del tiempo de viaje en función de su longitud, encontrándose valores crecientes conforme aumenta la distancia.

También se reconocen percepciones diferentes para el grado de hacinamiento conforme se viaje sentado o de pie. Lo más frecuente es reconocer un crecimiento lineal para el ponderador del tiempo de viaje en función del grado de hacinamiento, usualmente a partir de un punto relativamente cargado (por ejemplo, cuando quedan pocos asientos disponibles). Wardman y Whelan (2011) mencionan que, si bien la mayoría de los trabajos revisados imponen linealidad de este efecto, en uno de los estudios en que se ajustaron distintas formas funcionales, el grado de no linealidad resultó pequeño. No obstante lo anterior, si se expresa la función comenzando desde grados de hacinamiento bajos, aparecen indicios de no linealidad, como en Douglas y Karpouzis (2006). En Fletcher y El-Geneidy (2013), se postula que el efecto del hacinamiento empieza a ser relevante a partir del 60% de ocupación de los vehículos. Finalmente, Wardman y Whelan (2011) postulan el inicio del efecto para factores de carga (definidos como pasajeros/asientos) entre 60% y 90%.

Dentro del contexto nacional, existen trabajos como el de Tirachini et al. (2017), que estudia a pasajeros del Metro de Santiago a través de ejercicios de preferencias declaradas, con los que estiman modelos logit multinomial, logit mixto y de clases latentes. El ponderador del tiempo se supone una función lineal de la densidad de pasajeros por metro cuadrado, utilizando pendientes distintas dependiendo si el pasajero está sentado o de pie. El mayor ponderador, asociado a la densidad máxima (6 pasajeros por metro cuadrado) es de 2,2, para un pasajero de pie.

En Batarce et al. (2016), se obtienen ponderadores del valor del tiempo para pasajeros de trenes y buses, suponiendo parámetros comunes a ambos modos, a través de ejercicios de preferencias declaradas con los que se estima un modelo logit mixto. El ponderador correspondiente a la densidad máxima (6 pasajeros por metro cuadrado) es de 2,51. Adicionalmente, los autores estudian los efectos en la modelación y análisis costo-beneficio, de algunas políticas (aumentos de velocidad, de capacidad y de frecuencia), simulando un corredor simple. Encuentran que, al incluir el hacinamiento en la función de utilidad modal, cambian las conclusiones de un análisis costo-beneficio estándar, entre otras razones porque el efecto de reducción de hacinamiento resulta mayor que el de las reducciones de tiempo de espera.

## 2.2 Prácticas de Evaluación

Una revisión sobre prácticas internacionales en evaluación de proyectos de transporte permite detectar los países en que se considera explícitamente el hacinamiento (para una síntesis de las metodologías vigentes hasta ese momento, ver Mackie y Worsley, 2013). El hacinamiento es generalmente incluido a través de ponderadores, reconociéndose transversalmente una relación creciente (aunque no necesariamente estricta) entre el valor del tiempo y el grado de hacinamiento. En la Tabla 1 se muestran algunos aspectos diferenciadores entre las prácticas revisadas.

Se puede notar, en primer lugar, que la fuente de los multiplicadores es variada. El Reino Unido desarrolló un estudio con trabajo de campo de alcance nacional, mientras que los valores para Francia provienen de encuestas realizadas solamente en París. Por otra parte, las recomendaciones australianas provienen de un análisis de 14 estudios, tanto australianos como neozelandeses.

**Tabla 1** Selección de prácticas nacionales de evaluación

País	Referencia	Fuente	Modos	Valor máximo
Francia	Quinet (2013)	Estudio <i>ad-hoc</i>	Transporte Público	1,61
Reino Unido	Batley et al. (2019)	Estudio <i>ad-hoc</i>	Bus y Tren	2,14 - 2,32
Noruega	TOI (2020)	Estudio <i>ad-hoc</i>	Transporte Público	1,65
Nueva Zelanda	NZ Transport Agency (2016)	Metaanálisis	Bus	1,40
Australia - Nacional	ATAP (2018)	Metaanálisis	Bus, LRT, Tren	1,90
Australia - NSW	Transport for NSW (2016)	Estudio <i>ad-hoc</i>	Tren	2,10

Respecto de la forma funcional utilizada, Noruega, y Francia explicitan una función lineal a partir de cierto nivel de hacinamiento. En Australia se estimaron funciones exponenciales (aunque con un reducido grado de no linealidad). Por otra parte, en Nueva Zelanda solo se distingue entre pasajeros sentados y de pie, mientras que el Reino Unido presenta una tabla con valores para cinco niveles de densidad distintos para el bus, y diez para el tren.

El crecimiento de la función de hacinamiento está acotado por un valor máximo, correspondiente al multiplicador asociado a la máxima densidad posible, típicamente de 6 pasajeros por metro cuadrado. Las prácticas revisadas reportan valoraciones entre 1,4 y 2,3 veces el valor del tiempo. Esta situación dependerá, entre otros factores, de la condición de hacinamiento de referencia usada para estimar los valores.

Sobre la diferenciación por modo, el tren es el único modo estudiado en Australia - NSW, y los valores para el Reino Unido provienen de una experiencia particularmente extensa. En algunos casos, como Francia y Noruega, se aplican multiplicadores comunes a todos los modos de transporte público, mientras que el valor del tiempo base es diferenciado para las distintas tecnologías.

Sin embargo, no en todas estas prácticas se aplican ponderadores de hacinamiento a todos los propósitos de viaje. Cuando los viajes de negocios son valorados mediante el enfoque de tasa salarial, el valor del tiempo de viaje es constante, como en Australia - NSW. En el Reino Unido también se utiliza un valor constante para estos viajes. Por otra parte, dado que en la encuesta de este último país se incluyeron muy pocos viajes de negocios (por no considerarse relevantes en modos como el bus), se utilizan ponderadores distintos para los propósitos de viaje regular y otros, al contrario que Francia, Nueva Zelanda, Australia y Noruega, que no distinguen entre ellos. Más aún, las recomendaciones francesas y australianas no distinguen entre distintos propósitos de viaje.

### 3. MÉTODO

El método propuesto en este trabajo considera, para los usuarios de transporte público, la determinación de valores del tiempo dependientes del grado de hacinamiento que los usuarios experimentan. Los minutos consumidos en cada arco de la red tendrán un costo distinto, dependiendo de qué tanto su demanda (de pasajeros) se aproxime a la capacidad ofrecida. De esta forma, en la evaluación social se permite que además de capturar beneficios por ahorros de tiempo

de viaje, se puedan recoger los efectos de la reducción de hacinamiento, inducida por aumentos de capacidad en el sistema de transporte público.

Para lograr lo anterior, se requiere, en primer lugar, definir una medida de hacinamiento compatible con los resultados de las simulaciones a través del modelo; en segundo lugar, la definición de una función de ponderadores de tiempo de viaje que sea consistente con los hallazgos empíricos; y, finalmente, considerando que el valor social vigente para la evaluación de proyectos está asociado a un nivel de hacinamiento promedio, traducir la función de ponderadores de tiempo de viaje a una función de valor social en función del grado de hacinamiento.

### 3.1 Medida de Hacinamiento

La práctica habitual para la evaluación social de proyectos estructurales de transporte urbano en Chile supone la comparación del consumo de recursos en las situaciones base y con proyecto de acuerdo al modelo ESTRAUS (De Cea *et al.*, 2003). Esta herramienta cuenta con la capacidad de modelar el equilibrio oferta – demanda en redes multimodales de transporte urbano, en específico, en redes que incorporan transporte público de superficie (buses) y en redes independientes (metro, trenes, tranvías). La asignación de pasajeros a líneas de transporte público se considera en forma explícita; esta característica es necesaria pues, como se mostrará más adelante, se requiere conocer los flujos de pasajeros por servicio (que, en conjunto con la oferta permiten describir el grado de hacinamiento) y los tiempos de viaje en cada arco de la red. La metodología propuesta postula que el factor de carga, es decir, la relación entre el flujo y la capacidad (medidos ambos en pasajeros/tiempo) es un indicador suficiente para representar el grado de hacinamiento en análisis estratégicos basados en modelos macroscópicos. El factor de carga es una buena alternativa a la densidad de pasajeros por metro cuadrado, pues no requiere conocer en detalle las características de la flota para obtener densidades de pasajeros de pie. Así, la elección de esta medida se justifica por cuanto no requiere conversiones ni mayores supuestos, además de permitir la obtención directa de valores representativos a nivel de arco, como se verá más adelante.

Un primer cálculo del grado de hacinamiento promedio en un arco de la red (cuyo tiempo de viaje en equilibrio es resultado de la simulación), lo define como la media ponderada (a través de los flujos) del hacinamiento experimentado por los pasajeros de cada servicio  $i$ . Sabiendo que, en cada servicio, el grado de hacinamiento viene dado por el cociente entre el flujo  $q$ , y la oferta  $S$ , la expresión toma la forma siguiente:

$$Hac_{arco} = \frac{\sum_i q_i \frac{q_i}{S_i}}{\sum_i q_i} \quad (3)$$

Al estar enfocadas a la identificación de efectos a escala de ciudad completa, las simulaciones a nivel estratégico de proyectos de transporte público urbano reproducen más adecuadamente los patrones de movimiento a nivel de corredores que a nivel de servicios específicos. Este hecho, además de hacer desaconsejable incorporar distinciones entre pasajeros de pie y sentados a este nivel de análisis, motiva la generación de una aproximación diferente al grado de hacinamiento por arco. Esta propuesta se prefirió en la agregación de los flujos y ofertas de los distintos servicios en cada arco. El grado de hacinamiento utilizado, entonces, está dado por la siguiente ecuación:

$$Hac_{arco} = \frac{\sum_i q_i}{\sum_i S_i} \quad (4)$$

Es fácil demostrar que esta aproximación es siempre menor al primer cálculo (que requiere conocer con precisión las asignaciones de pasajeros a cada servicio), por lo tanto, se considera una aproximación conservadora.

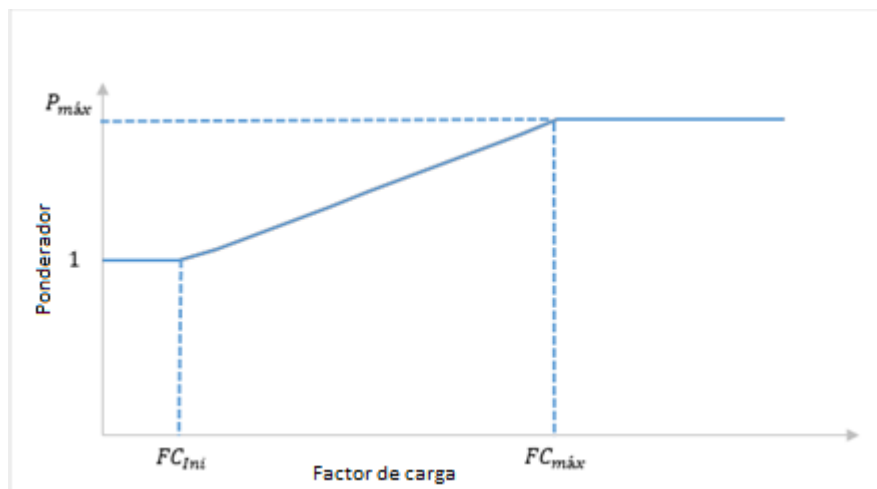
### 3.2 Función Ponderador de Hacinamiento

#### 3.2.1 Forma Funcional

Una vez definida la medida de hacinamiento, es necesario construir una forma para la relación entre ponderadores del valor del tiempo y el grado de hacinamiento, que, inspirada en la práctica internacional, y considerando las limitaciones que impone el uso de modelos de macroscópicos de simulación, tome en cuenta las consideraciones teóricas descritas en la sección anterior.

La forma funcional elegida consta de un primer tramo horizontal. Esto se debe a que de acuerdo con la literatura y la práctica internacional (Wardman y Whelan, 2011, Fletcher y El-Geneydy, 2013), la percepción del hacinamiento se inicia una vez que gran parte de los asientos del vehículo están ocupados. Una vez alcanzado ese punto, que se denotará como  $FC_{ini}$ , se elige un crecimiento lineal para el ponderador de hacinamiento, de acuerdo con lo encontrado en Quinet (2013) o en TOI (2020). Dado el uso de simulaciones de nivel estratégico en la aplicación, este crecimiento no puede ser ilimitado y debe necesariamente congelarse para factores de carga elevados (de ocasional ocurrencia en los modelos), con el fin de evitar contabilizar reducciones de hacinamiento ficticias, provenientes de representaciones puntualmente inadecuadas.

Se trabajará, entonces, con funciones de la forma indicada en la Figura 1. Como se verá a continuación, el parámetro  $FC_{ini}$  puede ser distinto para cada tipo de vehículo considerado en el análisis.



**Figura 1** Forma funcional escogida

### 3.2.2 Elección de Parámetros

La función ponderadora del valor social en esta propuesta estará completamente definida una vez elegidos los parámetros  $FC_{ini}$ ,  $FC_{máx}$  y  $P_{máx}$ . Aún cuando la elección de estos parámetros pretende ser fundamentada, el impacto de estas definiciones en el cálculo de beneficios de los proyectos analizados se estudiará a través de sensibilizaciones, en la sección siguiente.

En primer lugar, para  $FC_{ini}$  se siguió el procedimiento expuesto en la sección anterior, reconociendo el punto de inicio de percepción de hacinamiento cuando gran parte (en torno al 75%) de los asientos del vehículo se encuentren ocupados. Así, el valor de  $FC_{ini}$  vendrá dada por:

$$FC_{ini} \approx \frac{3}{4} \times FC_{asientos\ ocupados} \quad (5)$$

Para identificar qué porcentaje de la capacidad total de los vehículos corresponde a asientos, fue necesario caracterizar los vehículos que prestan servicios de transporte público en el país. En primer lugar, respecto de los servicios de buses, la Tabla 2 presenta los valores referenciales utilizados para relacionar el número de asientos y la capacidad total del vehículo.

**Tabla 2** Capacidades totales y número de asientos para buses urbanos

Tipo de Vehículo	Capacidad (pasajeros / vehículo)	Asientos (porcentaje del total)	Pasajeros de pie (porcentaje del total)
Taxibuses	44	29 (66%)	15 (34%)
Buses	92	25 (27%)	67 (73%)
Buses articulados	161	35 (22%)	126 (78%)

Se observa que el factor de carga para el cual se utilizan completamente los asientos es similar para buses articulados y buses de 12 metros, como los usados en Santiago. En los taxibuses, que son casi la totalidad de la flota ofrecida en regiones, los asientos representan un mayor porcentaje de su capacidad total.

De esta forma, se obtienen valores extremos para  $FC_{asientos\ ocupados}$  de 0,25 y 0,66, asociados a los casos en que la flota completa está compuesta de buses o de taxibuses, respectivamente. Se decidió utilizar un valor representativo nacional de  $FC_{asientos\ ocupados}$  igual a 0,33, cercano al valor medio ponderado. De esta forma, usando la ecuación (5) se obtiene un valor central para  $FC_{ini}$  igual a 0,25.

Se puede notar que, al elegir trabajar con grados de hacinamiento agregados, característicos de cada arco y no de cada servicio, tiene sentido definir un valor promedio si la ciudad en que se ubica el proyecto posee una flota compuesta por distintos tipos de buses.

Respecto de los trenes, la caracterización de los sistemas urbanos vigentes es la indicada en la Tabla 3. El valor presentado para Santiago corresponde a un promedio de los distintos trenes que operan en la ciudad, en cuyos coches el porcentaje de asientos está entre 11% y 17% de la



capacidad. Para el Merval (Gran Valparaíso) también se presenta un valor promedio, en que el porcentaje de asientos varía entre 18% y 21% de la capacidad.

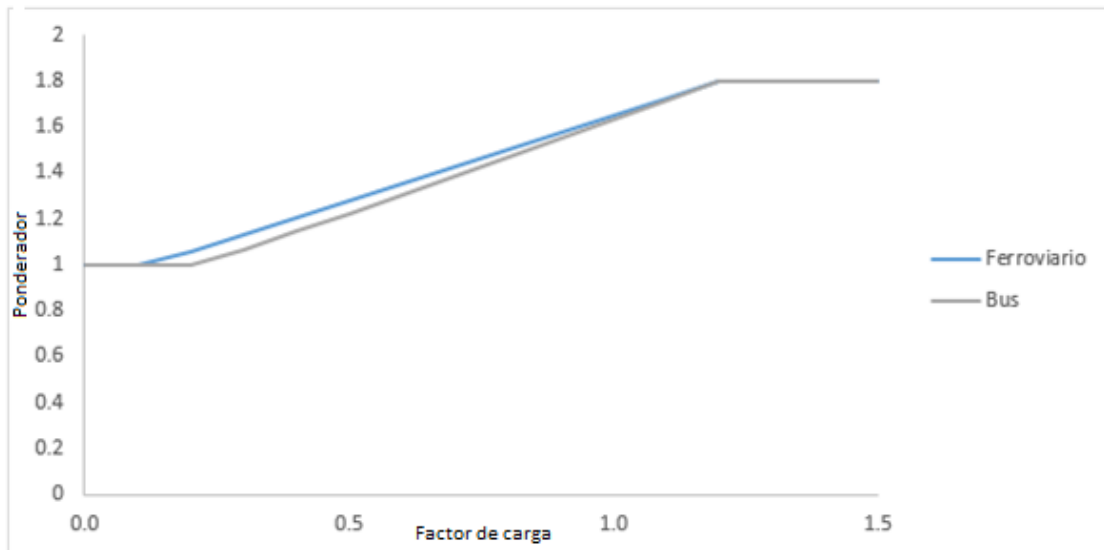
**Tabla 3** Capacidades totales y número de asientos para trenes urbanos

Modo	Capacidad (pasajeros por coche)	Asientos (porcentaje del total)	Pasajeros de Pie (porcentaje del total)
Merval	256	49 (19%)	207 (81%)
Metro de Santiago	202	29 (14%)	173 (86%)
Tren Nos	259	46 (18%)	213 (82%)
Biotrén	271	86 (32%)	185 (68%)

El porcentaje de asientos para trenes es más bajo y más similar entre ciudades que los valores encontrados para distintos tipos de buses. Así, para este modo se decidió elegir un  $FC_{ini}$  de 0,16, correspondiente al promedio ponderado nacional.

Respecto de  $FC_{máx}$ , se decidió utilizar un valor igual a 1,2, pues tras revisar numerosas simulaciones en distintas ciudades, se llegó a la conclusión que factores de carga mayores constituían - en general - resultados alejados de la realidad y no servicios sobresaturados. El uso de un factor de carga a partir del cual el ponderador del valor del tiempo de viaje no cambia, permite limitar la inclusión de beneficios ficticios provenientes de la reducción de factores de carga no representativos.

Finalmente, de la revisión de prácticas internacionales, se decidió seleccionar (en forma conservadora), un ponderador máximo  $P_{máx}$  de 1,8, equivalente aproximadamente al valor promedio de los ponderadores máximos presentados en la Tabla 1. En la Figura 2 se muestran las funciones escogidas para el modo bus y el modo ferrocarril urbano.



**Figura 2** Ponderadores del precio social, según modo

### 3.3 Función Valor Social del Tiempo

Una vez escogidos los parámetros característicos, el ponderador del valor del tiempo está completamente definido en función de los factores de carga. Resta, sin embargo, vincular estos ponderadores al precio social vigente, para poder expresar el valor social del tiempo (función del factor de carga) en unidades monetarias.

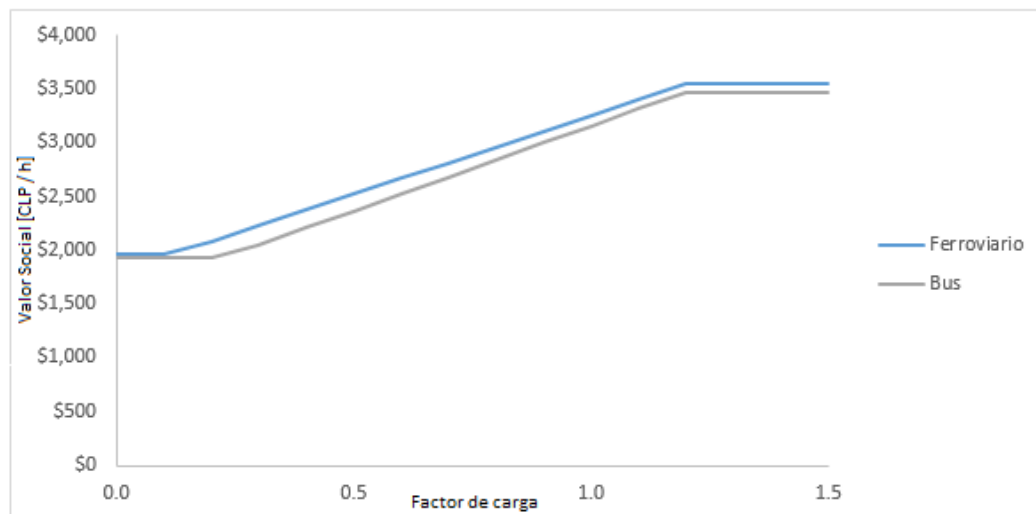
Para esto, en primer lugar, se asumirá que el valor social del tiempo en transporte público urbano actualmente vigente para evaluación social de proyectos corresponde al precio de un minuto típico, asociado a un grado de hacinamiento promedio nacional. Se requerirá entonces, en segundo lugar, una aproximación para este promedio, es decir:

$$VST_{2021} = VST_{base_i} \times P_{promedio_i} \quad (6)$$

Para obtener el  $P_{promedio_i}$ , se consideró una muestra de aplicaciones de modelos estratégicos de transporte en doce ciudades del país, cuya operación en la situación base fue simulada para dos períodos de análisis: punta mañana y fuera de punta, en un día laboral normal. A partir de las modelaciones de cada ciudad se calculó el ponderador promedio para cada minuto consumido en la red de transporte público, para cada período y modo. Posteriormente se supuso que el día laboral normal estaba bien representado (en todas las ciudades, excepto Santiago) por 4 horas punta y 10 horas fuera de punta. Para Santiago, en cambio, se consideró el día laboral normal compuesto por 6 horas punta y 10 fuera de punta. Esta proporción de horas se escogió teniendo en cuenta las diferencias en el funcionamiento del transporte público entre ciudades. Posteriormente, usando nuevamente los minutos consumidos como peso, se obtuvo un ponderador promedio nacional. Los resultados de este procedimiento se muestran en la Tabla 3.3.

**Tabla 4** Ponderadores promedio de hacinamiento por modo

Modo	Ponderador Promedio
Buses	1,262
Trenes	1,237

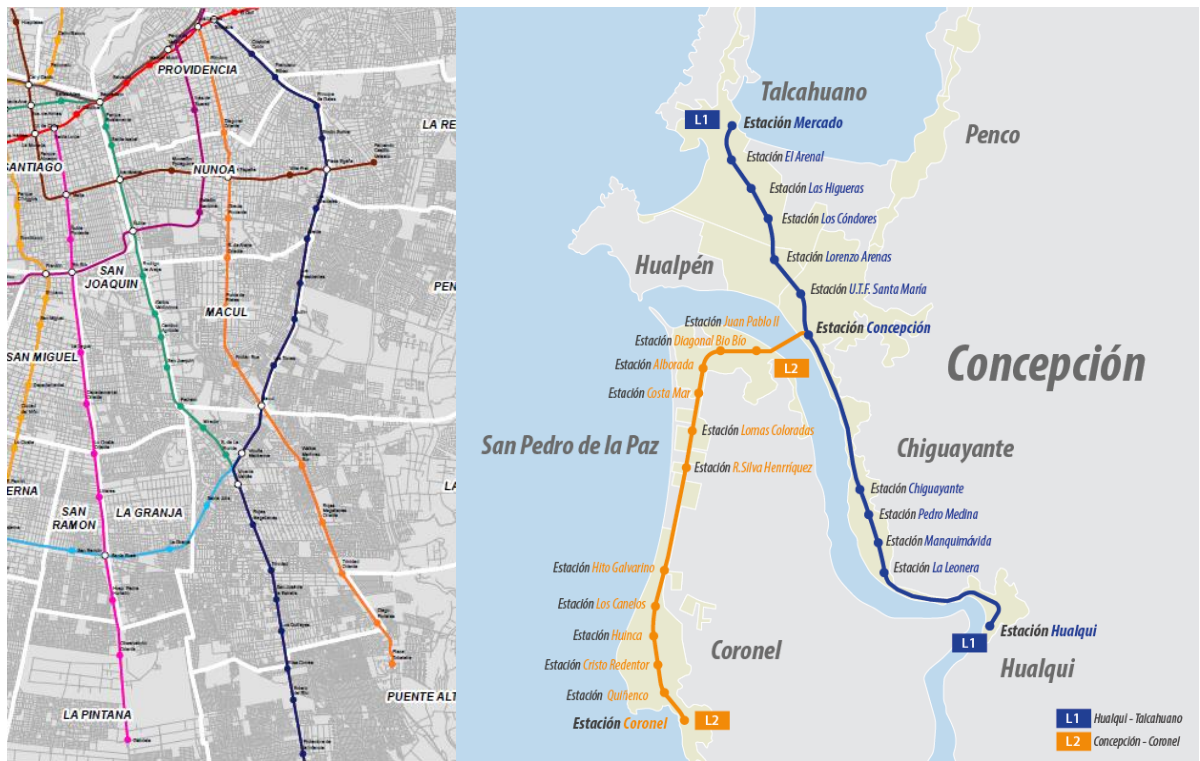


**Figura 3** Funciones de valor del tiempo por modo

Finalmente, al valor social del tiempo vigente en el año 2021 (2.434 CLP/h) se le asoció un ponderador de hacinamiento igual al promedio de cada modo. Con esto se obtienen las curvas de la Figura 3, donde se evidencia que los supuestos utilizados y los promedios obtenidos resultan en una pequeña diferencia en los valores del tiempo base, los valores máximos, y las curvas en general. Consideraciones prácticas orientarán la reflexión sobre si las pequeñas diferencias obtenidas ameritan el uso de funciones de valor del tiempo distintas por modo (como se hace en la sección siguiente), o si, por el contrario, sería preferible utilizar una común para ambos modos de transporte público.

#### 4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la evaluación social de los siguientes tres proyectos: Línea 8 Metro de Santiago, Línea 9 Metro de Santiago y ampliación de capacidad de Biotrén. Los trazados aproximados de los proyectos se muestran en la Figura 4.



**Figura 4** Trazados referenciales de proyectos simulados: Líneas 8 (naranja) y 9 (magenta) de Metro de Santiago (izquierda) y ampliación de capacidad de Biotrén (derecha)

El proyecto de la Línea 8 de Metro, se ubica en Santiago, en el eje Av. La Florida – Macul - Los Leones, atravesando las comunas de Puente Alto, La Florida, Macul, Ñuñoa y Providencia. Tiene 18,9 kilómetros de longitud con 14 estaciones, donde combina con otras cuatro líneas (1, 3, 4 y 6). El proyecto de la Línea 9 de Metro, se ubica en Santiago, en el eje Av. Santa Rosa atravesando las comunas de La Pintana, San Ramón, La Granja, San Joaquín, San Miguel y Santiago. Tiene 16,8 kilómetros de longitud con 13 estaciones, y también combina con otras cuatro líneas (1, 3, 4A y 6).

Finalmente, el proyecto de ampliación de capacidad del Biotrén, consiste en mejorar la frecuencia de los trenes de la red de Concepción, reduciendo los intervalos en el tramo Talcahuano – Hualqui de 30 a 11 minutos en horario punta y de 30 a 14 minutos en horario valle. Para el tramo Coronel – Concepción, los intervalos pasan de 30 a 14 minutos en horario valle.

La Tabla 5 presenta, para cada proyecto, los beneficios calculados para los usuarios de transporte público (normalizados respecto de la evaluación tradicional, que no incorpora hacinamiento, y cuyo nivel se asume igual a 100). Se presenta el caso central, con la elección de parámetros indicada en la sección anterior, así como los resultados de las sensibilizaciones respecto de  $FC_{ini}$ ,  $FC_{máx}$  y  $P_{máx}$ .

**Tabla 5** Beneficios sociales proyectos evaluados, distintos escenarios

Escenario Evaluado / Proyecto	Línea 8 Santiago	Línea 9 Santiago	Ampliación Biotrén
Evaluación Tradicional	100	100	100
Con hacinamiento: $FC_{ini} = 0,25$ $FC_{máx} = 1,2$ $P_{máx} = 1,8$	124	130	119
$FC_{ini} = 0,2$	124	130	119
$FC_{ini} = 0,5$	121	125	116
$FC_{máx} = 1,0$	129	135	124
$FC_{máx} = 1,5$	122	120	115
$P_{máx} = 1,5$	121	128	112
$P_{máx} = 2,0$	126	131	123

Se observa que la magnitud de los beneficios adicionales debidos a la incorporación del hacinamiento fluctúa entre 19% y 30%, con los parámetros fijados en el caso central. Así, se puede inferir que la omisión de esta dimensión del viaje en la evaluación social de proyectos afecta considerablemente su rentabilidad. Los escenarios de sensibilidad evaluados muestran que la selección de valores para los parámetros, afecta solo modestamente este resultado.

Para revisar el impacto de este aumento de beneficios en los indicadores de rentabilidad social, se supusieron costos de inversión de USD 90 MM por kilómetro, para los proyectos de líneas 8 y 9 de Metro de Santiago, y de USD 6 MM para cada tren en el proyecto de Concepción. Se encuentra que, al considerar hacinamiento, las tasas internas de retorno de estos tres proyectos aumentarían de 6,43%, 6,54% y 7,22%, a 7,57%, 7,60% y 9,06%, respectivamente. Es decir, el aumento en beneficios antes descrito se traduce en uno o dos puntos porcentuales adicionales de TIR.

La selección de un mayor valor para  $FC_{ini}$ , que buscaría reconocer el impacto de buses más pequeños (como los del Gran Concepción), reduce marginalmente los beneficios de los proyectos. Los cambios en  $FC_{máx}$  afectan a los beneficios en el mismo sentido. De acuerdo a lo esperado, el aumentar el valor de  $P_{máx}$  tiende a aumentar los beneficios adicionales por concepto de reducción de hacinamiento.

De esta forma, el impacto relativo de las variaciones en los valores elegidos para cada parámetro es distinta en cada proyecto. La mayor amplitud encontrada es en la evaluación del proyecto de

---

ampliación de capacidad del Biotrén ante cambios en  $P_{m\acute{a}x}$ . Cabe destacar que este proyecto es también el que presentaba originalmente una mayor rentabilidad.

## 5. CONCLUSIONES

El hacinamiento es una dimensión relacionada con el bienestar de los usuarios de transporte público que no ha sido abordada hasta el momento por las metodologías nacionales de evaluación de proyectos de transporte. En este trabajo se ha propuesto una forma para recoger los efectos de intervenciones que alteren el grado de hacinamiento de los vehículos de transporte público, a través de simulaciones con un modelo capaz de representar esta variable.

La inclusión de este fenómeno, distinto al ahorro de tiempo, aporta beneficios que, para los tres proyectos analizados, constituyen entre 19% y 30% de los tradicionalmente contabilizados para los usuarios de modos públicos de transporte. La propuesta tiende a favorecer a proyectos que aumentan la oferta de transporte público.

La metodología se basa en definir la forma funcional del ponderador de tiempo de viaje en función del grado de hacinamiento característico de cada arco de la red. Ahora, como aproximar el grado de hacinamiento experimentado por los usuarios por un valor agregado para el arco completo es un supuesto bastante grueso, se considera no provechoso mantener la reconocida distinción entre pasajeros sentados y de pie.

Para la definición práctica de valores sociales en función del vehículo y grado de hacinamiento, es necesario fijar tres parámetros: el factor de carga a partir del cual se comienza a percibir hacinamiento, el factor de carga máximo - a contar del cual se considera un valor del tiempo constante - y el ponderador máximo. Solo la definición del primer parámetro se basa en la descripción de una situación observada; la definición del segundo es un asunto de convención sobre prácticas de modelación, y la del tercero, una cuestión mixta entre comparación de prácticas y política. En todo caso, para determinar  $FC_{ini}$ , debe decidirse si se prefiere utilizar descriptores nacionales o valores que reflejen las características locales de la flota. La revisión de prácticas internacionales permite afirmar que lo más frecuente parece ser la utilización de valores únicos, aun cuando puedan existir diferencias entre las características físicas o configuraciones de vehículos de transporte público en distintas localidades.

Respecto de los proyectos presentados, tendría sentido postular que la flota de transporte público de superficie del Gran Concepción se ve mejor representada por un  $FC_{ini}$  igual a 0,5. No obstante, el análisis de sensibilidad de la Tabla 5 muestra que los beneficios del proyecto disminuirían dada esa selección. Notar que en este trabajo se consideró el mismo conjunto de parámetros para los tres proyectos en el escenario central, independientemente de su localización.

En cualquier caso, el análisis de sensibilidad realizado muestra que el impacto de la selección de valores específicos para los tres parámetros de la función de valor social del tiempo afecta poco los beneficios de los proyectos y sus indicadores de rentabilidad. Esto es particularmente cierto para  $FC_{ini}$ . De hecho, el aumento de beneficios debido a la incorporación de la reducción de hacinamiento se sostiene aún en los casos en que se eligen aquellos valores que entregan los resultados más conservadores para la definición de la función valor social del tiempo.

---

Los ejemplos presentados en este trabajo se basan en simulaciones macroscópicas, por lo que la propuesta en su estado actual es aplicable a proyectos cuya evaluación social considere un nivel de análisis estratégico. Por ejemplo, además de servicios de ferrocarril urbano, pueden estudiarse planes de corredores de transporte público.

El enfoque presentado puede adaptarse a la herramienta de simulación que se disponga. Así, es factible implementar esta propuesta metodológica para estudiar intervenciones de un alcance más limitado (por ejemplo, a través de un análisis táctico), en la medida que el modelo seleccionado para asignar pasajeros de transporte público entregue resultados satisfactorios en términos de tiempos de viaje y cargas de los servicios. En este mismo nivel de análisis, también sería factible estudiar los impactos de medidas relacionadas con la configuración de los vehículos, tales como la modificación del número de asientos, cuyos impactos son múltiples (sobre el  $FC_{ini}$ , sobre la capacidad del vehículo, sobre las frecuencias ofrecidas) y deberían tratarse adecuadamente. En cualquier caso, como el enfoque propuesto está pensado para un nivel de análisis estratégico, agregando la eventual diversidad de flota en arcos, no se considera necesario diferenciar entre pasajeros sentados y de pie. De hacerlo, se requeriría un tratamiento más detallado para evaluar los impactos de esta medida a nivel de línea.

En las simulaciones macroscópicas comúnmente utilizadas, el fenómeno de hacinamiento sólo se recoge mediante un aumento de los tiempos de espera, si es que los vehículos de transporte público se encuentran cargados cerca de su capacidad (un impacto relevante), pero no se modela la mayor desutilidad del tiempo de viaje, aspecto que también podría ser crítico en la elección de modo o ruta. El método propuesto implica incorporar una dimensión relevante en la práctica de evaluación social de proyectos y nuestro análisis evidencia la necesidad de incluirlo en la modelación de demanda. Esto haría, en parte, consistentes las etapas de modelación y evaluación; sin embargo, podría ser posible que la función de valores del tiempo que se calibre en el modelo no sea la misma utilizada para la evaluación del proyecto, como sucede en general con los valores del tiempo.

Finalmente, es posible identificar, como adicionales líneas futuras de avance, la modelación y evaluación social del hacinamiento durante los tiempos de espera en andenes o estaciones, y su tratamiento en otros modos como tranvías. Consideramos que esta propuesta es un buen punto de partida para abordar tales situaciones.

## REFERENCIAS

ATAP (2018). Australian Transport Assessment and Planning Guidelines: M1 Public Transport. Australian Transport and Infrastructure Council, Canberra.

Batarce, M., Muñoz, J.C y Ortúzar, J. de D. (2016). Value crowding in public transport: implications for cost-benefit analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **91**, 358-378.

Batley, R., Bates, J., Bliemer, M., Börjesson, M., Bourdon, J., Ojeda Cabral, M., Chintakayala, P.K., Choudhury, C., Daly, A., Dekker, T., Drivyla, E., Fowkes, T., Hess, S., Heywood, C., Johnson, D., Laird, J., Mackie, P., Parkin, J., Sanders, S., Sheldon, R., Wardman, M. y Worsley, T. (2019). New appraisal values of travel time saving and reliability in Great Britain. *Transportation* **46**, 583-621.

De Cea, J., Fernández, E., Dekock, V., Soto, A. y Friez, T. (2003). ESTRAUS: a computer package for solving supply-demand equilibrium problems on multimodal urban transportation networks with multiple user classes. *Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington, DC.

Douglas, N. y Karpouzis, G. (2006). Estimating the passenger cost of train over-crowding. *29<sup>th</sup> Australasian Transport Research Forum*, Gold Coast, septiembre 2006.

Fletcher, G. y El-Geneidy, A. (2013). Effects of fare payment types and crowding on dwell time: fine-grained analysis. *Transportation Research Record* **2351**, 124-132.

ITF (2017). Quantifying the socio-economic benefits of transport. *ITF Roundtable Reports*, OECD Publishing, Paris.

Li, Z. y Hensher, D. A. (2011). Crowding and public transport: a review of willingness to pay evidence and its relevance in project appraisal. *Transport Policy* **18**, 880-887.

Litman, T. (2020). Evaluating Public Transit Benefits and Costs. Best Practices Guidebook, Victoria Transport Policy Institute.

Mackie, P. y Worsley, T. (2013). International comparisons of transport appraisal practice. *Working Paper*, Institute for Transport Studies, University of Leeds.

MDS-SECTRA (2013). Manual de Evaluación Social de Proyectos de Vialidad Urbana, Chile.

MIDEPLAN-SECTRA (2008). Actualización Metodológica Análisis Sistema de Transporte de Ciudades de Gran Tamaño y Tamaño Medio, Chile.

NZ Transport Agency (2016). *Economic Evaluation Manual*. New Zealand Transport Agency, Wellington, New Zealand.

Quinet, E. (2013). L'évaluation socio-économique des investissements publics. *Report of the Commissariat-General for Strategy and Foresight*, Paris, France.

Tirachini, A., Hensher, D.A. y Rose, J.M. (2013). Crowding in public transport systems: effects on users, operation and implications for the estimation of demand. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **53**, 36-52.

Tirachini, A., Hurtubia, R., Dekker, T. y Daziano, R. (2017) Estimation of crowding discomfort in public transport: results from Santiago de Chile. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **103**, 311-326.

TOI (2020) Value of travel time and related factors. *Technical Report 1762/2020*, Institute of Transport Economics – Norwegian Centre for Transport Studies.

---

Transport for NSW (2016) *Principles and Guidelines for Economic Appraisal of Transport Investment and Initiatives: Transport Economic Appraisal Guidelines*. Transport for New South Wales, Australia.

Whelan, G. y Crockett, J. (2009). An investigation of the willingness to pay to reduce rail overcrowding. *International Conference on Choice Modelling*, Harrogate, England.